



Received: 15-07-2015
Accepted: 30-07-2015

Anales de Edificación
Vol. 1, N°2, 17-26 (2015)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2015.3100

Estudio experimental del comportamiento a compresión de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero

Experimental study of performance self-compacting concrete reinforced with steel fibers

J.L. Sánchez, A. Cobo, B. Díaz & I. Mateos

U.P.M (Spain, joseluis.sanchezp@upm.es), U.P.M. (Spain, alfonso.cobo@upm.es); Lafarge España (borja.siaz@lafarge.com); Lafarge

Abstract - Self-compacting steel fibers reinforced concrete simultaneously has the advantages of self-compacting concrete and reinforced with fibers. A material of high performance in their laying on site, toughness and ductility is achieved. This paper has studied the mechanical behavior of a self-compacting concrete reinforced with steel fibers. Have been made compression tests, as well as non-destructive testing (measuring the speed of ultrasound and sclerometer test). The results show the variation of the response of concrete with time, the difference with the traditional concrete and the feasibility of using non-destructive techniques for controlling this type of concrete.

Index Terms— Steel fibers reinforced concrete: self compacting concrete, compression tests;

Resumen -- El hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero presenta simultáneamente las ventajas de los hormigones autocompactantes y de los reforzados con fibras. Se consigue un material de altas prestaciones en cuanto a su colocación en obra, tenacidad y ductilidad. En este trabajo se ha estudiado el comportamiento mecánico de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero. Se han realizado ensayos a compresión a distintas edades, así como ensayos no destructivos (medida de la velocidad de ultrasonidos e índice esclerométrico). Los resultados muestran la variación de la respuesta del hormigón con el tiempo, la diferencia existente con los hormigones tradicionales y la viabilidad del empleo de técnicas no destructivas para el control de este tipo de hormigones.

Index Terms— Steel fibers reinforced concrete: self compacting concrete, compression tests;

I. INTRODUCCIÓN

El hormigón en masa tiene una baja resistencia a tracción y muy poca capacidad de deformación, por lo que su empleo en estructuras exige la incorporación de otros materiales, habitualmente acero de armar o pretensar. El acero empleado como refuerzo es continuo y se localiza específicamente en

zonas estratégicas de la estructura para optimizar su rendimiento.

La incorporación de fibras de acero a la matriz del hormigón modifica sustancialmente las propiedades del material base, aumentando su ductilidad y resistencia a flexotracción. Las fibras son discontinuas y normalmente se distribuyen aleatoriamente en la matriz de hormigón. En muchos casos, las fibras se usan en aplicaciones estructurales junto con armaduras tradicionales, sustituyéndolas parcial o totalmente.

Desde la antigüedad se ha utilizado la adición de fibras para mejorar las características de materiales de construcción, como el uso de crines de caballo o de paja en el adobe. Las fibras de asbesto empezaron a usarse en 1900 y en 1935 se desarrollan las fibras sintéticas y el nylon. La primera patente de hormigón reforzado con acero granular procedente de desechos por A. Berard en California data de 1874 y en 1927 G. Martín realiza una patente sobre hormigón reforzado con alambres rizados de acero para tuberías. En 1943 Constantinescu patenta en Inglaterra un hormigón reforzado con fibras helicoidales y espirales para pavimentos de carros de combate y refugios. A partir de 1970 comienza su uso en España.

El hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) es un hormigón fabricado con cemento hidráulico, áridos y fibras de acero discontinuas. Cuando está sometido a tracción, el SFRC solamente falla después de que las fibras de acero se rompan o se desprendan de la matriz cementicia por el deslizamiento de la fibra, este último modo de fallo constituye la rotura típica y deseable en el SFRC.

Las propiedades del SFRC en estado fresco y endurecido, incluyendo la durabilidad, son consecuencia de su naturaleza compuesta. La forma en cómo la adición de fibras influye en el comportamiento del hormigón o del mortero es un tema de investigación continuo. Una aproximación a la mecánica del SFRC es considerarlo como un material compuesto cuyas propiedades pueden estar relacionadas con las de las fibras (volumen, resistencia, módulo elástico y esbeltez), las propiedades del hormigón (resistencia, volumen, y módulo elástico) y las propiedades de la unión entre la fibra y la matriz.

Debido a la enorme versatilidad y flexibilidad de los métodos de fabricación actuales, el hormigón reforzado con fibras es un material de construcción económico y útil. Por ejemplo, los paneles delgados (de 13 a 20 mm de espesor) prefabricados de hormigón reforzado con fibras son viables económicamente en USA y Europa. En soleras, minería, túneles y aplicaciones en excavación, se ha utilizado hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) en lugar de los reforzados con mallas de acero electrosoldadas.

El SFRC tiene ventajas sobre el hormigón armado convencional en cuanto a varios usos. Un ejemplo es el uso de hormigón proyectado reforzado con fibras (SFPS) para túneles, ejecución de taludes en roca y como revestimiento para apoyo de la excavación. Los trabajos que normalmente se llevan a cabo en la colocación de mallas o barras de refuerzo en estas aplicaciones pueden ser eliminados. Recientemente se han empleado con éxito en elevated slabs (Soranakom et al. 2007). En España el mayor campo de aplicación del HRFA corresponde al hormigón proyectado y a los pavimentos (Almansa et al. 1997).

El mecanismo del refuerzo con fibras de la matriz cementicia del hormigón ha sido ampliamente estudiada en términos de la resistencia de las fibras a ser extraídas de la matriz de hormigón. Se han realizado intentos para relacionar la resistencia al arrancamiento de la fibra con las propiedades mecánicas del SFRC (Shah et al, 1971) (Shah 1974) (Shah, 1983) (Naaman et al, 1975) (Naaman et al, 1976) (Shah et al, 1976) (Stang et al, 1986) (Gray et al, 1978) (Gray et al, 1984) (Gray et al, 1987).

Como consecuencia de la naturaleza de las fibras, éstas dotan al hormigón de una extraordinaria ductilidad después de la fisuración de la matriz cementicia, que de otro modo se comportaría de una manera frágil. Las mejoras en la ductilidad dependen del tipo y del porcentaje de las fibras presentes (Johnston et al, 1974) (Anderson, 1978) (Johnston, 1982). Las fibras con mayor resistencia a ser extraídas se fabrican con formas rizadas u onduladas, superficies deformadas, con extremos en forma de gancho para mejorar el anclaje o ampliando el final de éstas en forma de pala. Este tipo de fibras son más efectivas que las equivalentes de forma recta uniforme con la misma longitud y diámetro. Como consecuencia, el número necesario de estas fibras para lograr el nivel de mejora requerido en resistencia y ductilidad, es normalmente menor que la cantidad que se necesitaría de fibras rectas y uniformes (Brandshaug et al, 1978) (Balaguro et al, 1986) (Johnston et al, 1986).

Las fibras de acero mejoran la ductilidad del hormigón bajo todo tipo de carga, pero su eficacia en la mejora la resistencia a compresión, tracción, esfuerzo cortante, torsión y flexión varía.

La resistencia a compresión solo se ve afectada ligeramente con la presencia de las fibras. Algunos investigadores han constatado incrementos en la resistencias que varían de 0 al 15% para un 1,5% de volumen de fibras (Johnston et al, 1986) (Dixon et al, 1971) (Kar et al, 1972) (Chen et al, 1971) (Williamson, 1974). En otros casos se han detectado pequeñas disminuciones en la resistencia a compresión (Turmo et al. 2008; Altun et al. 2004). En todos los casos se han obtenido fuertes incrementos en la tenacidad, sobre todo cuando las fibras de acero poseen los extremos conformados.

La resistencia a tracción aumenta de manera significativa, con unos aumentos del orden del 30 al 40% por un 1,5% de volumen de fibras en el mortero o el hormigón (Williamson, 1974) (Johnston et al, 1978).

Las fibras de acero mejoran la resistencia al cortante y a la torsión. Existen pocos estudios experimentales acerca de la resistencia a cortante y a torsión de elementos armados únicamente con fibras en contraposición al número de trabajos existentes en los que se ha estudiado el comportamiento de vigas reforzadas de forma conjunta con fibras y armaduras. Se ha comprobado que el aumento de la resistencia a cortante puro del SFRC depende de la técnica de ensayo y del grado de

alineación de las fibras en la zona de fallo del cortante (Barr, 1987). Para un 1% en volumen de fibras, esta resistencia oscila desde porcentajes insignificantes hasta el 30% (Barr, 1987).

Diversas investigaciones han justificado el aumento de la resistencia a cortante en vigas de SFRC (Batson, 1986) (Umoto et al, 1981) (Narayanan et al, 1987) (Jindal, 1984). Las fibras de acero tienen varias ventajas potenciales cuando se usan para aumentar o reemplazar estribos verticales en vigas (Williamson, 1978). Estas ventajas son: i) El tamaño de las grietas en hormigones con fibras de acero es menor al que se tiene con armaduras tradicionales; ii) la resistencia a la rotura y la resistencia a tracción del hormigón puede ser aumentada por las fibras; y iii) la resistencia al cortante se incrementa por la resistencia de las fibras a ser extraídas de la matriz de hormigón.

Las fibras de acero en una cuantía suficiente y dependiendo de su forma geométrica pueden aumentar la resistencia a cortante de las vigas de hormigón lo suficiente como para evitar un fallo frágil a esfuerzo cortante y forzar un fallo de la viga a flexión (Jindal, 1984) (Jindal et al, 1984) (Sood et al, 1987) (Jindal et al 1987) (Williamson et al, 1975) (Narayanan et al, 1988).

El aumento de la resistencia a flexión del SFRC es substancialmente mayor que a tracción o a compresión debido al comportamiento dúctil del SFRC en la zona fisurada por tracción, desarrollando resistencias residuales. Cuando se emplean contenidos elevados de fibras (1–1.5% en volumen) de ratios elevados (65 – 80) se obtienen HRFA de elevadas resistencias residuales a la tracción después de la fisuración, lo que hace a estos hormigones interesantes para constituir el material de elementos con una capacidad de carga mucho mayor que su carga de fisuración (Taheri et al. 2012). Como consecuencia de la high post-cracking residual strength of SFRC, el empleo de este material supone enormes ventajas en aplicaciones como elevated Steel fibre reinforced concrete slabs (E-SFRC) (Salehian et al. 2015; Sasani et al. 2008).

La distribución de tensiones resultante de un ensayo a flexión para niveles elevados de carga es plástica en la zona de tracción y elástica en la zona de compresión, lo que supone un desplazamiento del eje neutro hacia la zona de compresión (Hannant, 1978). En los primeros estudios (Romualdi et al, 1964) se intuyó que la resistencia a flexión podría duplicarse con un 4% en volumen de fibras en el mortero de cemento. Actualmente se ha podido comprobar que la presencia del árido grueso con las dosificaciones habituales limita el volumen práctico máximo de fibras en el hormigón en el orden de un 1,5 a 2,0%. Un resumen de los datos correspondientes a la resistencia a flexión (Johnston, 1986) muestra que esta resistencia en el SRFC es de un 50 a 70% mayor que en la matriz de un hormigón sin reforzar en un ensayo a flexión en tres puntos (Dixon et al, 1971) (Kar et al,

1972) (Shah et al, 1971) (Works et al, 1964). El uso de un volumen mayor de fibras, punto central de carga, o de fibras con una alineación significativa en dirección longitudinal, produce un aumento del 150% (Johnston, 1974) (Snyder et al, 1972) (Waterhouse et al, 1972) (Lankard, 1972) (Johnston, 1989).

El hormigón autocompactante (HAC) tiene una breve historia frente al HRF. A partir del año 1983 se inicia en Japón una línea de investigación (Okamura, 1997) que concluye en 1988 por el profesor Ozawa con un prototipo de hormigón colocable en obra sin ningún tipo de compactación, denominado en un principio “High Performance concrete” para años más tarde denominarse hormigón Autocompactante (Self Compacting Concrete). De 1989 data la primera publicación en la Conferencia de Ingeniería Estructural del Este de Asia y Pacífico, se presenta en 1992 en el meeting del American Concrete Institute, y en 2007 se publican las primeras normas UNE.

Además de las ventajas propias del HAC y del HRFA, el empleo de un HACRFA supone una sinergia del empleo de los dos hormigones anteriores en el siguiente sentido: debido a la mayor densidad de las fibras de acero respecto del resto de los componentes del hormigón, existe una tendencia a

TABLA I
DENOMINACION DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

EDAD (DÍAS)	PROBETA CILÍNDRICA	PROBETA CÚBICA
7	ACC7D1	ACQ7D1
	ACC7D5	ACQ7D2
	ACC7D6	
14	ACC14D1	ACQ14D1
	ACC14D3	ACQ14D2
	ACC14D6	
28	ACC28D1	ACQ28D1
	ACC28D2	ACQ28D2
	ACC28D3	
90	ACC90D1	ACQ90D1
	ACC90D2	ACQ90D2
	ACC90D3	

incrementar la proporción de fibras en la parte inferior de los elementos hormigonados respecto de la parte superior. Esto se produce fundamentalmente durante el vibrado de los elementos (Barros et al. 2003). El empleo del HACRFA elimina el inconveniente anterior, obteniendo elementos más homogéneos a lo largo de la sección transversal (Cunha 2010; Oliveira 2010).

En este trabajo se estudia el comportamiento de un hormigón que combina dos características de los denominados

TABLA II
RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE PROBETAS CILINDRICAS

PROBETA CILÍNDRICA	ENSAYO MECÁNICO				ESCLERÓMETRO		ULTRASONIDOS	
	σ_{\max} (MPa)	E (MPa)	σ_{\max} (MPa)	E (MPa)	σ_{\max} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	E (MPa)	E (MPa)
ACC7D1	26,68	15948	29.28	17053	25	26.8	14914	18851
ACC7D5	30,48	17402			28		23093	
ACC7D6	30,67	17809			27,5		18545	
ACC14D1	39,85	26246	41.28	27146	28,5	28.2	35733	28030
ACC14D3	41,88	28622			29		24403	
ACC14D6	42,10	26570			27		23953	
ACC28D1	41,56	32463	43.56	33926	29	29	33128	36294
ACC28D2	42,03	34037			29,5		39192	
ACC28D3	47,10	35277			28,5		36563	
ACC90D1	50.04		44.57	35716	34	32.8		
ACC90D2	48.72				31			
ACC90D3	49.22				33,5			

“hormigones de altas prestaciones”. Por un lado el Hormigón Reforzado con fibras (HRF), concretamente con fibras de acero (HRFA) y por otro el Hormigón Autocompactante (HAC). De este modo se obtiene un material que combina las características de los dos tipos de hormigón anteriores, consiguiendo las ventajas en las prestaciones que produce cada uno de ellos sobre el hormigón convencional, como son la capacidad para llenar completamente un encofrado alcanzando una plena compactación del hormigón (hormigón autocompactante), y un aumento de la tenacidad, de la ductilidad, de la resistencia a punzonamiento, de la resistencia a cortante e incremento de la carga máxima respecto del hormigón en masa que procuran la adición de fibras de acero.

II. OBJETIVOS

En este trabajo experimental se ha estudiado el comportamiento a compresión de un HACRFA. Se han elaborado probetas cilíndricas y cúbicas que se han ensayado a compresión a las edades de 7, 14, 28 y 90 días. Adicionalmente se han empleado dos técnicas no destructivas de caracterización del material: el índice esclerométrico y la velocidad de ultrasonidos.

Los resultados permiten i) obtener la evolución de las propiedades del hormigón con el tiempo, ii) comprobar los resultados obtenidos sobre probetas cilíndricas y cúbicas y iii) comparar los valores obtenidos experimentalmente con los estimados por distintas normas y iv) comparar los resultados obtenidos mediante los ensayos mecánicos y las técnicas no destructivas.

III. MATERIALES Y TÉCNICAS UTILIZADAS

El hormigón objeto de este estudio experimental parte de una amasada realizada el 03/03/2014 en la planta de la

empresa LAFARGE en Alcobendas (Madrid) pertenece a la denominación comercial AGILIA METAL. Su denominación según la Instrucción EHE08 (Ministerio de Fomento, 2008) es HA-25/AC/12/IIa. Para su fabricación se ha empleado cemento CEM II/A-M (P-V) 42,5 R fabricado por Lafarge, con un contenido de 350 Kg/m³, una relación agua cemento de 0,56 al que como aditivos se añaden Plastificante 1,9 y Superplastificante 5,8. Como refuerzo se han utilizado fibras de acero trefiladas en frío de 50 mm de longitud y 0.62 mm de diámetro (esbeltez....), con una dosificación de 10 kg/m³, suministradas por la empresa Bekaert y con la denominación comercial Dramix.

Los ensayos a compresión se han realizado sobre 12 probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura y 8 probetas cúbicas de 150 mm de lado. En la Tabla 1 se indican las denominaciones de las probetas fabricadas y la edad a la que han sido ensayadas.

Los ensayos se han realizado a las edades de 7, 14, 28 y 90 días en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid, mediante la prensa universal IBERTEST MIB60-AM equipada con software wintest 32. Para cada edad se han ensayado a compresión hasta rotura 3 probetas cilíndricas y 2 probetas cúbicas. Las probetas cilíndricas se han instrumentalizado con galgas extensométricas para obtener el módulo de elasticidad longitudinal. Los ensayos se han realizado controlando la deformación. Para complementar la información obtenida mediante los ensayos mecánicos, se han realizado ensayos no destructivos: índice esclerométrico y velocidad de ultrasonidos.

La determinación del índice esclerométrico se ha realizado mediante el Esclerómetro modelo N fabricado por A.

TABLA III
RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE PROBETAS CÚBICAS

PROBETA CUBICA	ENSAYO MECÁNICO		ESCLERÓMETRO		ULTRASONIDOS	
	σ_{\max} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	E (MPa)	E (MPa)
ACQ7D1	42,71	42.93	25,6	26.0	39587	35281
ACQ7D2	43,15		25,5		30973	
ACQ14D1	50,04	47.10	28,5	27.7	39451	38236
ACQ14D2	44,16		27,0		37019	
ACQ28D1	53,32	53.23	29,0	29.2	38138	38271
ACQ28D2	53,13		29,5		38413	
ACQ90D1	54,35	56.37	34,0	32.5	37854	37976
ACQ90D2	58,39		31,0		38098	

Eisenhut, cada determinación se ha obtenido como la media de 9 medidas sobre cada cara de probeta.

La determinación de la velocidad de Ultrasonidos se ha realizado utilizando el comprobador ultrasónico de hormigón CAT. E0046-E0046/Z.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

En las tablas 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos para las probetas cilíndricas y cúbicas, respectivamente.

En las columnas 2 y 3 de la tabla 2 se indican la tensión máxima alcanzada y el módulo de elasticidad longitudinal para cada probeta ensayada a compresión. En las columnas 4 y 5 se indican para cada edad los valores medios de las columnas 2 y 3. En la columna 6 se muestran los resultados obtenidos con el esclerómetro y en la columna 7 se indica la media para cada edad. En las columnas 8 y 9 se muestra una información análoga a la anterior para el módulo de elasticidad longitudinal estimado a partir de la velocidad de ultrasonidos.

En la tabla 3 se muestra una información similar a la de la tabla 2 excepto para las medidas correspondientes al módulo de elasticidad longitudinal obtenido en los ensayos mecánicos, que en este caso no aparecen debido a que las probetas cúbicas no se han instrumentalizado con galgas extensiométricas.

V ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Resistencia a compresión. Evolución con el tiempo

Debido al largo proceso del fraguado del cemento y del crecimiento de los cristales, la resistencia mecánica del hormigón se incrementa durante el transcurso del tiempo, sin embargo la máxima intensidad de su crecimiento se produce en el período inicial de su fraguado.

La gráfica de la figura 1 muestra la evolución en el tiempo de la resistencia a compresión para los dos tipos de probetas ensayadas. En el caso de la probeta cúbica el crecimiento de la

resistencia se produce de forma más gradual que en el caso de la probeta cilíndrica, en la cual desde los 7 a los 14 días se produce un fuerte incremento de resistencia que posteriormente se estabiliza en el tiempo.

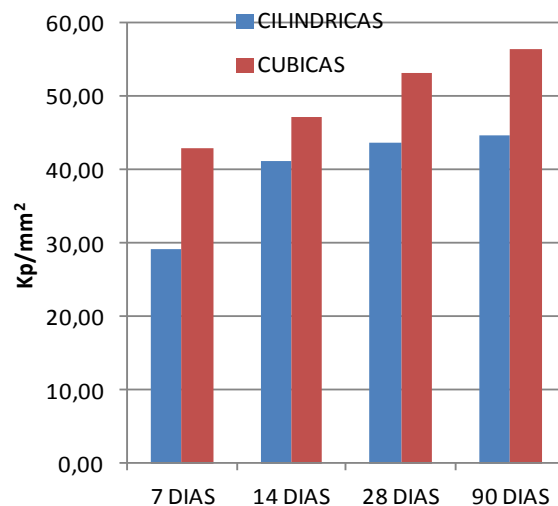


Fig. 1: Tensiones medias a compresión en probetas cilíndricas y cúbicas a distintas edades

Las normas ofrecen expresiones para predecir la evolución de las propiedades mecánicas con el tiempo. La Instrucción EHE 08 indica la siguiente expresión para obtener la resistencia media del hormigón a compresión a partir del valor de la resistencia media a compresión a la edad de 28 días:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (1)$$

donde:

β_{cc} : Coeficiente que depende de la edad del hormigón

$$\beta_{cc} = \exp\{s[1-28/t]^{1/2}\}$$

f_{cm} : Resistencia media obtenida mediante ensayo a los 28 días

t: Edad del hormigón en días

s: Coeficiente que depende de la velocidad de endurecimiento del cemento, en nuestro caso cemento rápido, $s=0.2$

En la tabla 4 se muestra la evolución en el tiempo (en tanto por 1) de la resistencia media a compresión para probeta cilíndrica, probeta cúbica y el valor estimado por la Instrucción EHE 08 tomando como referencia el valor obtenido a 28 días.

TABLA IV
EVOLUCION CON EL TIEMPO DE LA RESISTENCIA
MEDIA A COMPRESION

	EDAD (DÍAS)			
	7	14	28	90
CILÍNDRICA	0.67	0.95	1.00	1.02
CÚBICA	0.76	0.88	1.00	1.06
EHE 08	0.82	0.92	1.00	1.09

El análisis de la tabla permite comprobar que a 7 días la instrucción EHE 08 sobreestima la resistencia respecto de los valores experimentales, estando el valor obtenido sobre probeta cilíndrica más alejado que el obtenido sobre probeta cúbica. A los 14 días la instrucción EHE 08 ofrece un valor intermedio y cercano a los obtenidos experimentalmente en ambos tipos de probeta, sobreestimando el resultado en probeta cúbica e infravalorando el de la cilíndrica. A la edad de 90 días, la Instrucción EHE08 ofrece valores más altos que los experimentales, estando más cercano el valor de la probeta cúbica que el de la cilíndrica.

TABLA V
COEFICIENTE DE CONVERSION A DISTINTAS EDADES

EDAD (DÍAS)	RESISTENCIA MEDIA CILÍNDRICA (MPa)	RESISTENCIA MEDIA CÚBICA (MPa)	COEFICIENTE DE CONVERSIÓN
7	29.28	42.93	0.68
14	41.28	47.10	0.88
28	43.56	53.23	0.82
90	44.57	56.37	0.79

A las edades de 14 y 90 días, la diferencia entre los valores experimentales y la estimación de la Instrucción EHE08 no difiere en más de un 9%. Sin embargo, a la edad de 7 días las discrepancias son muy superiores, llegando a un máximo de un 22% para las probetas cilíndricas.

Resistencia a compresión. Coeficiente de conversión

La forma y el tamaño de la probeta influyen de manera apreciable en su resistencia a compresión. Como consecuencia de la introducción de carga axial durante el ensayo a compresión, las probetas dilatan transversalmente por efecto Poisson. En la superficie de contacto entre las caras de la probeta y los platos de la prensa se genera una fuerza horizontal como consecuencia del rozamiento entre el hormigón y el acero. Esta fuerza origina una coacción a la dilatación transversal en las zonas superior e inferior de la

probeta que incrementa la carga de rotura conforme disminuye la esbeltez de la probeta.

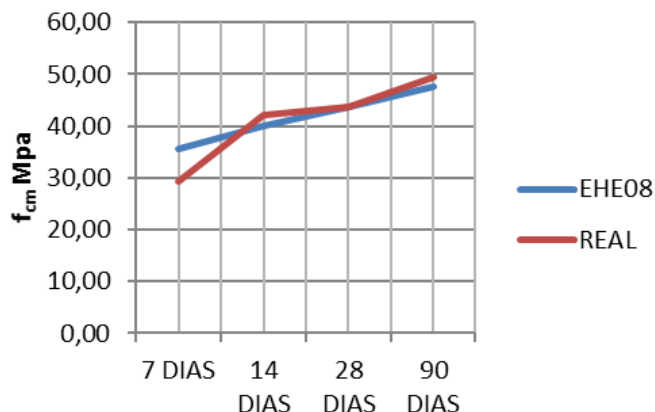


Fig. 2: Comparativa entre los valores predictivos y los valores reales obtenidos en los ensayos.

La Instrucción EHE 08 establece un coeficiente de conversión de 0.90 para estimar la resistencia en probeta cilíndrica cuando se conoce la resistencia en probeta cúbica. Este valor se ajusta mucho al valor de 0.88 con $R^2=0.94$, obtenido por Xie (Xie et al. 2015) en un estudio sobre la resistencia a compresión de un HRFA con incorporación de partículas de caucho.

En la tabla 5 se muestra para cada edad el coeficiente de conversión obtenido para las resistencias medias alcanzadas experimentalmente en las probetas ensayadas.

El análisis de la tabla 5 permite comprobar que a ninguna edad se alcanza el valor de 0.90, indicado por la Instrucción EHE08. A la edad de 14 días la diferencia entre los valores experimentales y el valor de la norma es mínimo, mientras que a las edades de 7 y 90 días las diferencias son apreciables (24% y 12%, respectivamente).

Módulo de elasticidad longitudinal

Las normas ofrecen expresiones para poder estimar el valor del módulo de elasticidad longitudinal del hormigón a partir de características mecánicas o físicas.

La formulación del Eurocódigo 2 y la Instrucción EHE08 coinciden y relacionan el valor del módulo de elasticidad longitudinal con el de la resistencia media a compresión, al igual que el Código modelo (FIP,2010). La norma ACI (American Concrete Institute, 2008) considera también el valor de la densidad para poder predecir el módulo de elasticidad longitudinal.

Las expresiones aportadas por las normas anteriores son las siguientes:

$$\text{EHE08/EC2} \quad E_c = 8500 \cdot f_{cm}^{1/3} \quad (2)$$

$$\text{CM90} \quad E_c = 2,15 \cdot 10^4 (f_{cm}/10)^{1/3} \quad (3)$$

$$\text{ACI-08} \quad E_c = \rho_c \cdot 0,043 f_{cm}^{1/2} \quad (4)$$

donde E_c es el módulo de elasticidad longitudinal, f_{cm} es la resistencia media del hormigón a compresión y ρ_c es la densidad del hormigón.

Los datos obtenidos se muestran en las Tablas VI y Figura 3.

TABLA VI
COMPARACIÓN DE LOS VALORES REALES CON LOS ESTIMADOS

PROBETA	σ_{max} MPa	E_c MPa REAL	E_c (MPa) EC/EHE	E_c (MPa) CM90	E_c (MPa) ACI-08
ACC7D1	15,948	15948	25398,86	29819,50	24083,53
ACC7D5	17,402	17402	26551,59	31172,87	25872,99
ACC7D6	17,809	17809	26606,65	31237,51	26385,97
ACC14D1	26,246	26246	29033,21	34086,41	30135,75
ACC14D3	28,622	28622	29518,06	34655,65	30309,11
ACC14D6	26,570	26570	29569,66	34716,22	30498,00
ACC28D1	32,463	32463	29442,69	34567,16	30835,87
ACC28D2	34,037	34037	29553,26	34696,97	31252,83
ACC28D3	35,277	35277	30696,76	36039,50	33152,63

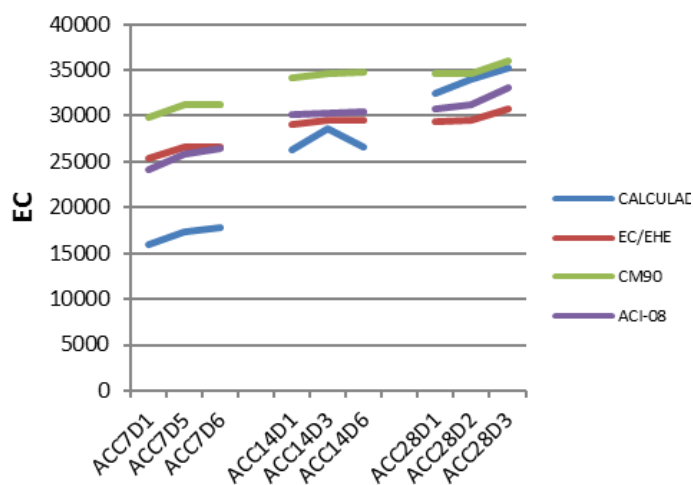


Fig. 3: Comparativa entre los valores estimados por las normativas y los valores reales obtenidos en los ensayos

Se observa que los valores estimados por las distintas normas analizadas quedan por encima del valor real obtenido, el mejor ajuste se encuentra a la edad de 28 días, mientras que para 14 días el ajuste es intermedio. En cualquier caso, el valor real siempre queda por debajo de las estimaciones para edades de 7 y 14 días, los valores reales superan a los estimados por ACI, EHE y EC quedando por debajo de la predicción del CM.

Esclerómetro

En la figura 4 se muestra una comparación entre los valores obtenidos para la resistencia a compresión en el ensayo a rotura y empleando el esclerómetro. Se indican los resultados

para probeta cilíndrica y cúbica. El análisis de los resultados permite comprobar que, para ambos tipos de probeta, las tensiones de rotura obtenidas en el ensayo a compresión son superiores a las estimadas mediante el esclerómetro. Para probeta cilíndrica, y a la edad de 7 días, los resultados no difieren en más de un 10%, en el resto de los casos las diferencias son muy superiores lo que permite afirmar que el empleo del esclerómetro en este tipo de hormigones para predecir su tensión de rotura, requiere de una calibración distinta a la empleada para hormigones normales. Posiblemente la infravaloración de la resistencia que se obtiene al usar el esclerómetro se debe a que el árido grueso empleado es de menor tamaño que el de los hormigones convencionales lo que supone que la masa metálica del esclerómetro golpea en masas de hormigón que presentan una menor oposición a su deformación local.

Además, empleando el esclerómetro no es posible predecir el incremento de la resistencia con la edad del hormigón. En efecto, a partir de los datos obtenidos con el esclerómetro, las tensiones apenas aumentan con la edad de la probeta, mientras que en los valores obtenidos con la rotura real, lo hacen en mucha mayor medida, encontrando sólo coincidencia en los valores obtenidos para probetas cilíndricas y para la edad de 7 días, alejándose los valores en mayor medida para edades mayores.

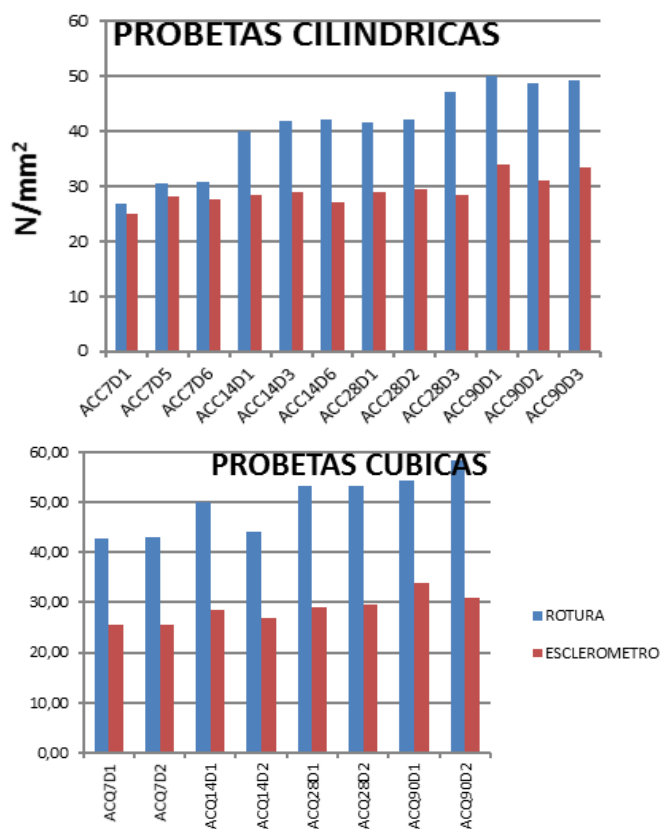


Fig. 4: Comparación de los valores obtenidos reales con los obtenidos por el ensayo esclerométrico.

Velocidad de Ultrasonidos

La comparación en probetas cilíndricas de los valores del módulo de elasticidad longitudinal obtenidos a partir de los ensayos experimentales y de su estimación mediante la velocidad de ultrasonidos se muestra en la Figura 5 y Tabla VII.

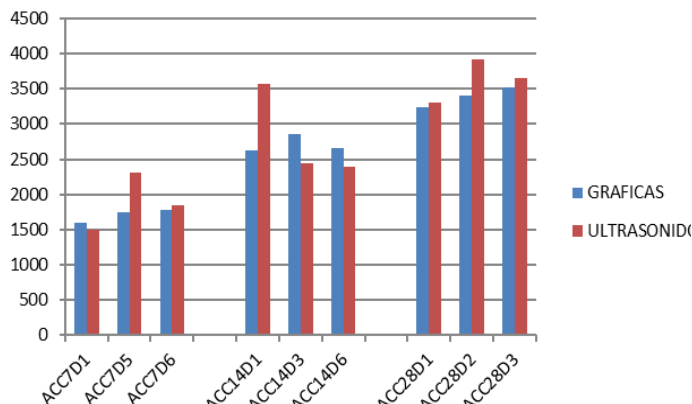


Fig. 5: Comparación de los valores del módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos mecánicos y con la velocidad de ultrasonidos

TABLA VII
COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE E OBTENIDOS MEDIANTE ENSAYO
ULTRASONIDOS Y ENSAYOS MECÁNICOS

PROBETA	REAL Ec MPa	ULTRASONIDOS Ec MPa
ACC7D1	15948	14914
ACC7D5	17402	23093
ACC7D6	17809	18545
ACC14D1	26246	35733
ACC14D3	28622	24403
ACC14D6	26570	23953
ACC28D1	32463	33128
ACC28D2	34037	39192
ACC28D3	35277	36563

El análisis de la figura 5 permite indicar que no se observa un patrón de comportamiento uniforme entre los valores obtenidos del ensayo de ultrasonidos y los valores reales, aunque el ajuste en los valores medios es aceptable. El valor obtenido en el ensayo de ultrasonidos es en general mayor que el real.

VI. CONCLUSIONES

En el caso de la probeta cúbica, el crecimiento de la resistencia a compresión del hormigón con el tiempo se

produce de forma más gradual que en el caso de la probeta cilíndrica.

La estimación de la resistencia a compresión utilizando la expresión de la EHE08 ofrece valores que no difieren en más de un 5 % con los reales para edades de 14 y 90 días, en el caso de una edad de 7 días la diferencia obtenida es de un 22 % mayor la estimada que la real.

A ninguna edad del hormigón se alcanza el valor de 0.90 como coeficiente de conversión de las resistencias en probetas cilíndricas y cúbicas indicado por la Instrucción EHE08. A la edad de 14 días la diferencia entre los valores experimentales y el valor de la norma es mínimo, mientras que a las edades de 7 y 90 días las diferencias son apreciables (24% y 12%, respectivamente).

Las estimaciones que realizan las distintas normas estudiadas para evaluar el módulo de elasticidad longitudinal tienen un pésimo ajuste al valor real obtenido a los 7 días, mientras que se aproximan más, aun siendo todos superiores, a los 14 días y ofrecen un buen ajuste a la edad de 28 días, siendo el valor obtenido por el Código Modelo siempre superior al real obtenido.

Para ambos tipos de probeta, las tensiones de rotura obtenidas en el ensayo a compresión son superiores a las estimadas mediante el esclerómetro. Además, empleando el esclerómetro no es posible predecir el incremento de la resistencia con la edad del hormigón.

El ensayo de ultrasonidos para predecir el valor del módulo de deformación del hormigón ofrece unos valores aceptables respecto a los reales. El valor obtenido en el ensayo de ultrasonidos es en general mayor que el real.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación y ayuda prestada por la empresa Lafarge, necesario para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Almansa E.M. & Cánovas M.F.(1997). Mix design of steel fibre reinforced concrete. *Mater Construcc* 47, 11-26.
- Altun F. & Haktanir T.A. (2004). Comparative experimental study of Steel fibre-additive reinforced concrete beams. *Mater Construcc* 54(276), 5-15.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE: *Commite 318 Building Code for Structural Concrete, ACI 318-08. ACI Manual of Concrete practice 2008*. Detroit (2008)
- Anderson, W. E., "Proposed Testing of Steel-Fibre Concrete to Minimize Unexpected Service Failures," *Proceedings, RILEM Symposium of Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites* (Sheffield, 1978), Construction Press, Lancaster, 1978, pp. 223-232.
- Balaguru, P., and Ramakrishnan, V., "Freeze-Thaw Durability of Fiber Reinforced Concrete," *ACI JOURNAL, Proceedings*, Vol. 83, No. 3, May-June 1986, pp. 374-382.

- Barr, B., "The Fracture Characteristics of FRC Materials in Shear," Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 27-53.
- Barros J.A.O. & Antunes J.A.B. (2003). Experimental characterization of the flexural behaviour of Steel fibre reinforced concrete according to RILEM TC 162-TDF recommendations. *RILEM TC 162 TDF Workshop*, 77-89.
- Batson, Gordon B., "Use of Steel Fibers for Shear Reinforcement and Ductility," Steel Fiber Concrete, Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., 1986, pp. 377-399.
- Brandshaug, T.; Ramakrishnan, V.; Coyle, W. V.; and Schrader, E. K., "A Comparative Evaluation of Concrete Reinforced with Straight Steel Fibers and Collated Fibers with Deformed Ends." Report No. SDSM&T-CBS 7801, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City, May 1978, 52 pp.
- CEB-CIP: *CEB-FIB Model Code (1990)*, Lausanne (Switzerland 1991).
- CEN: *Eurocode2 EC2*, Brussels, Belgium (1992).
- Chen, W., and Carson, J. L., "Stress-Strain Properties of Random Wire Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, Proceedings, Vol. 68, No. 12, Dec. 1971, pp. 933-936.
- Cunha V.M.C.F. (2010). *Steel fibre reinforced self-compacting concrete: from micromechanics to composite behavior*. Guimaraes, Portugal: University of Minho.
- Dixon, J., and Mayfield, B., "Concrete Reinforced with Fibrous Wire," Journal of the Concrete Society, Concrete, Vol. 5, No. 3, Mar. 1971, pp. 73-76.
- EHE 2008. Instrucción Española de Hormigón Estructural 2008. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Gray, R. J., and Johnston, C. D., "Measurement of Fibre-Matrix Interfacial Bond Strength in Steel Fibre Reinforced Cementitious Composites," Proceedings, RILEM Symposium of Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, Sheffield, 1978, Construction Press, Lancaster.
- Gray, R. J., and Johnston, C. D., "The Effect of Matrix Composition on Fibre/Matrix Interfacial Bond Shear Strength in Fibre-Reinforced Mortar," Cement and Concrete Research, Pergamon Press, Ltd., Vol. 14, 1984, pp. 285-296.
- Gray, R. J., and Johnston, C. D., "The Influence of Fibre/Matrix Interfacial Bond Strength on the Mechanical Properties of Steel Fibre-Reinforced-Mortars," International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 9, No. 1, Feb. 1987, pp. 43-55.
- Hannant, D. J., Fibre Cements and Fibre Concretes, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, United Kingdom, 1978, p. 53.
- Jindal, Roop L., "Shear and Moment Capacities of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," Fiber Reinforced Concrete—International Symposium, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 1-16.
- Jindal, Roop L., and Hassan, K. A., "Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam-Column Connections," Fiber Reinforced Concrete—International Symposium, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 107-123.
- Jindal, R., and Sharma, V., "Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Knee Type Connections," Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 475-491.
- Johnston, C. D., "Steel Fibre Reinforced Mortar and Concrete—A Review of Mechanical Properties," Fiber Reinforced Concrete, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 127-142.
- Johnston, C. D., "Definitions and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete," ASTM, Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 4, No. 2, Winter 1982, pp. 53-60.
- Johnston, C. D., and Gray, R. J., "Flexural Toughness First-Crack Strength of Fibre-Reinforced-Concrete Using ASTM Standard C 1018," Proceedings, Third International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement Concrete, RILEM, Sheffield, July 1, 1986, Paper No. 5.1.
- Johnston, C. D., and Gray, R. J., "Uniaxial Tension Testing of Steel Fibre Reinforced Cementitious Composites," Proceedings, International Symposium on Testing and Test Methods of Fibre-Cement Composites, RILEM, Sheffield, Apr. 1978, pp. 451-461.
- Johnston, C. D., and Gray, R. J., "Flexural Toughness First-Crack Strength of Fibre-Reinforced-Concrete Using ASTM Standard C 1018," Proceedings, Third International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement Concrete, RILEM, Sheffield, July 1, 1986, Paper No. 5.1.
- Johnston, C. D., "Steel Fibre Reinforced Mortar and Concrete—A Review of Mechanical Properties," Fiber Reinforced Concrete, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 127-142.
- Johnston, C. D., "Effects on Flexural Performance of Sawing Plain Concrete and of Sawing and Other Methods of Altering Fiber Alignment in Fiber Reinforced Concrete," Cement, Concrete and Aggregates, ASTM, CCAGDP, Vol. 11, No. 1, Summer 1989, pp. 23-29.
- Kar, N. J., and Pal, A. K., "Strength of Fiber Reinforced Concrete," Journal of the Structural Division, Proceedings, ASCE, Vol. 98, No. ST-5, May 1972, pp. 1053-1068.
- Lankard, D. R., "Flexural Strength Predictions," Conference Proceedings M-28, "Fibrous Concrete—Construction Material for the Seventies," Dec. 1972, pp. 101-123.
- Naaman, A. E., and Shah, S. P., "Bond Studies of Oriented and Aligned Fibers," Proceedings, RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete, London, Sept. 1975, pp. 171-178.
- Naaman, A. E., and Shah, S. P., "Pullout Mechanism in Steel Fiber Reinforced Concrete," ASCE Journal, Structural Division, Vol. 102, No. ST8, Aug. 1976, pp. 1537-1548.
- Narayanan, R., and Darwish, I. Y. S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement," ACI Structural Journal, Vol. 84, No. 3, May-June 1987, pp. 216-227.
- Narayanan, R., and Darwish, I. Y. S., "Fiber Concrete Deep Beams in Shear," ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 2, Mar.-Apr. 1988, pp. 141-149.
- Okamura, H. *Self Compacting High-Performance Concrete*. Journal of Concrete International vol. 19, nº7, 1977 p. 50-54
- Oliveira F.L. (2010). *Design-oriented constitutive model for steel fibre reinforced concrete*. Barcelona, Spain: Universidad Politècnica de Catalunya.
- Romualdi, James P., and Mandel, James A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," ACI JOURNAL, Proceedings, Vol. 61, No. 6, June 1964, pp. 657-671.
- Salehian H. & Barros J.A.O. (2015). Assessment of the performance of Steel fibre reinforced self-compacting concrete in elevated slabs. *Cement & Concrete Composites*, 55, 268-280.
- Sasani M. & Sagiorglu S. (2008). Progressive collapse of reinforced concrete structures: a multihazard perspective. *ACI Struct J*, 105(1), 95-105.
- Shah, S. P., and McGarry, F. J., "Griffith Fracture Criteria and Concrete," Engineering Mechanics Journal, ASCE, Vol. 97, No. EM6, Dec. 1971, pp. 1663-1676.
- Shah, S. P., "New Reinforcing Materials in Concrete Construction," ACI JOURNAL, Proceedings, Vol. 71, No. 5, May 1974, pp. 257- 262.
- Shah, S. P., "Fiber Reinforced Concrete," Handbook of Structural Concrete, edited by Kong, Evans, Cohen, and Roll, McGraw-Hill, 1983.

- Shah, S. P., and Naaman, A. E., "Mechanical Properties of Steel and Glass Fiber Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, Proceedings, Vol. 73, No. 1, Jan. 1976, pp. 50-53.
- Shah, S. P., and McGarry, F. J., "Griffith Fracture Criteria and Concrete," Engineering Mechanics Journal, ASCE, Vol. 97, No. EM6, Dec. 1971, pp. 1663-1676.
- Snyder, M. L., and Lankard, D. R., "Factors Affecting the Strength of Steel Fibrous Concrete," ACI JOURNAL, Proceedings, Vol. 69, No. 2, Feb. 1972, pp. 96-100.
- Sood, V., and Gupta, S., "Behavior of Steel Fibrous Concrete Beam Column Connections," Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 437-474.
- Soranakom C., Mobasher B. & Destrée X. (2007). Numerical simulation of FRC round panel tests and full scale elevated slabs. Deflection and stiffness issues in FRC and thin elements, SP-248, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, 31-40.
- Stang, H., and Shah, S. P., "Failure of Fiber Reinforced Composites by Pull-Out Fracture," Journal of Materials Science, Vol. 21, No. 3, Mar. 1986, pp. 935-957.
- Taheri M., Barros J.A.O. & Salehian H. (2012). Parametric study of the use of strain softening/hardening FRC for RC elements falling in bending. *J Mater Civil Eng* 24(3), 259-274.
- Turmo J., Bantia N., Gettu R. & Barragán B. (2008). Study of the shear behavior of fibre reinforced concrete beams. *Mater Construcc* 58(292), 5-13. Doi: 10.3989/mc.2008.40507.
- Umoto, Kabayashi, and Fujino, "Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with Steel Fibers as Shear Reinforcement," Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 3, 1981, pp. 245-252.
- Waterhouse, B. L., and Luke, C. E., "Steel Fiber Optimization," Conference Proceedings M-28, "Fibrous Concrete—Construction Material for the Seventies," Dec. 1972, pp. 630-681.
- Williamson, G. R., The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete, SP-44: Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 195-207.
- Williamson, G. R., "Steel Fibers as Web Reinforcement in Reinforced Concrete," Proceedings US Army Science Conference, West Point, Vol. 3, June 1978, pp. 363-377.
- Works, R. H., and Untrauer, R. E., Discussion of "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," ACI JOURNAL, Proceedings, Vol. 61, No. 12, Dec. 1964, pp. 1653-1656.
- Xie J., Guo J., Liu L. & Xie Z. (2015). Compressive and flexural behaviours of a new Steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. *Construction and Building materials* 79, 263-272. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.036

